

文章编号 1004-924X(2013)07-1850-08

采用稀疏表示的红外图像自适应杂波抑制

穆治亚^{1,2*}, 魏仲慧¹, 何 昕¹, 梁国龙¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对红外图像中弱小目标的检测问题,提出了一种基于图像稀疏表示的自适应杂波抑制方法。首先,采集 500 帧红外图像样本,通过训练学习构造包含图像各个层次结构特征的多成分超完备字典;然后,通过红外图像的协方差自适应地选择与图像子块对应的超完备字典对图像进行稀疏表示,利用匹配追踪算法得到子图像在超完备目标字典下的最佳表示系数;最后,根据表示系数以及对应的原子向量对图像子块进行重构,从而得到突出红外小目标的高信噪比重构图像,实现杂波抑制。不同环境下的多项实验表明,该算法可在复杂背景下自适应地抑制杂波,提高图像的信噪比;通过简单的阈值分割可以分开目标和背景,为之后的目标检测处理奠定基础。得到的性能评价指标显示:本算法计算量较小,实时性较强,鲁棒性较强,易于硬件实现。

关键词:红外图像;杂波抑制;稀疏表示;多成分超完备字典;匹配追踪

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1850

Adaptive clutter suppression of infrared images by using sparse representation

MU Zhi-ya^{1,2*}, WEI Zhong-hui¹, HE Xin¹, LIANG Guo-long¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: mufeng9@sina.com*

Abstract: In accordance with the detection of small targets in an infrared image, an adaptive clutter suppression method based on image sparse representation was proposed. First, 500 frames of infrared images were sampled, and an over complete and multi-component dictionary containing characteristics of every image layers was constructed through learning and training. Then, the over complete dictionary corresponding to the image subblock was selected adaptively to represent the image sparsely through the covariance of the infrared image, and the optimum representative coefficients of the sub-image under the over-complete target dictionary were obtained through matching the tracking algorithm. Finally, the image subblock was reconstructed according to the representative coefficients and the corresponding atomic vector and the high SNR reconstructed image which protruded the infrared small targets were acquired, and the clutter was suppressed. Many experiments under different circumstances indicate that the algorithm proposed in this paper can suppress the clutter under complex

收稿日期:2012-05-28;修订日期:2012-06-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50905174)

backgrounds and can raise the SNR. The target and background can be separated through simple threshold division, which lays foundation for the target detection process that follows up. Obtained results show that the method has smaller computation costs, stronger robustness and is easy to be realized by hardware.

Key words: infrared image; clutter suppression; sparse representation; over complete target dictionary; matching pursuit

1 引言

红外小目标检测问题是红外预警、精确制导、靶场测量等领域的重点研究课题^[1]。靶场测量中,由于子母弹等目标数量较多,在红外图像中只占一个到几个像素,而且目标形状和结构特征不明显,尤其在复杂背景下容易被背景云层、噪声等杂波淹没。因此,寻求一种有效的背景抑制方法是红外目标检测首要解决的问题^[2]。传统的杂波抑制方法大多采用中值滤波、高斯滤波、形态学滤波等。这些算法具有固定的滤波结构,对于理想条件下的红外图像有较好的抑制效果,却很难适应复杂背景下的红外图像。近年来有学者用 MRF^[3]通过正则化处理实现对红外背景杂波的自适应抑制。文献[4]将小波理论中的剪切波与贝叶斯统计机理相结合,将红外图像中的弱小目标和背景杂波进行分离,达到抑制背景的目的。文献[5]将分数阶积分理论引入红外图像背景抑制中,利用分数阶积分的非线性、低通频率等特性对背景和进行分离,结合警戒环技术来抑制背景。以上方法的共同点都是利用红外图像中处在低频部分的背景和处于高频部分的目标之间的差异性,将背景和进行分离,得到残差图像,从而抑制杂波。

受到人类视觉皮层神经元响应的稀疏性启发,Olshausen 与 Field 提出了一种对自然图像更为有效的表示方法:稀疏表示^[6-10]。稀疏表示是通过超完备字典对图像进行线性展开,展开后的大多数基函数系数必须为零,这样才能符合稀疏表示的基本特性,其中很少的非零系数用来表示图像中的结构特征和本质属性,而且由于模型分解采用的是冗余性的超完备字典,这样对图像背景和噪声更加稳健,可以为之后的图像滤波、图像恢复等处理带来很大方便。

本文结合图像编码理论,提出了一种基于图像稀疏表示的自适应杂波抑制方法。首先,对图像样本进行训练学习,构造包含图像各个层次结构特征的多成分超完备字典,然后,通过红外图像

的灰度直方图分布以及协方差算子,自适应地选择与图像子块对应的超完备字典对图像进行稀疏表示,通过匹配追踪算法得到子图像在过完备目标字典下的最佳表示系数。表示系数如果是稀疏的,表明图像子块中包含弱小目标;若表示系数相对均匀分布,则表示图像子块为背景杂波,从而可通过表示系数值的差异性达到杂波抑制的目的。

2 稀疏表示理论

给定一个集合 $U = \{x_1, x_2 \cdots x_i, i = 1, 2 \cdots r\}$, 其 x_i 是张成整个 Hilbert 空间 $H = \mathbf{R}^n$ 的单位矢量,且 $r \geq n$,称集合 U 为超完备字典,其元素称为原子(基函数)。对给定的信号 $f \in H$,都可以表示成原子 x_i 迭加的形式:

$$f = \sum_{i \in r} a_i x_i, \quad (1)$$

其中 a_i 为展开系数。由于字典是冗余的($r \geq n$), 矢量 x_i 不再是线性独立的,因此式(1)中的信号 f 的表示是非唯一的。假定超完备字典 D , 则超完备稀疏表示就是从所有表示中找出分级系数最为稀疏的一个。即求解:

$$\min \|a\|_0 \quad \text{subject to} \quad f = Ua_i, \quad (2)$$

其中 $\|a\|_0$ 为 L_0 范数, $\|a\|_0$ 表示系数非零项的个数。当 U 是 H 空间的一个非正交基时,图像的最稀疏表示非常简单,而且对于冗余超完备字典的稀疏表示最优化问题也将转化为 NP 难问题。在一定条件下,Donoho 等人提出 L_1 范数可以代替 L_0 范数,式(2)可以用以下公式代替:

$$\min \|a\|_1 \quad \text{subject to} \quad f = Ua_i. \quad (3)$$

通常情况下,公式(3)的求解问题可以转化为以下稀疏近似问题:

$$\arg \min \|a\|_1 \quad \text{subject to} \\ f = Ua_i + \varepsilon \quad \|a\|_0 \leq m, \quad (4)$$

其中 m 为约束信号展开系数的个数, ε 为原图像与重构信号的残差表示。

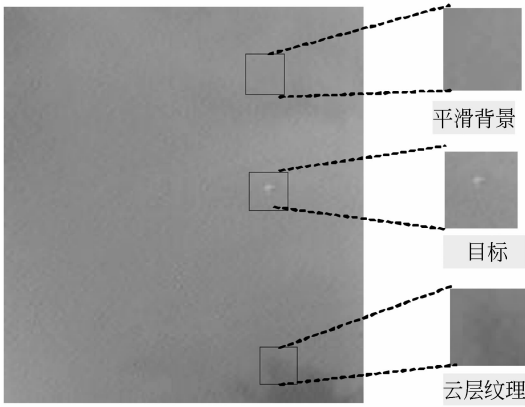
红外图像的杂波抑制过程是首先通过训练学习得到冗余的超完备字典,然后将红外图像按原

子大小进行分块处理,通过计算图像子块在超完备字典下的表示系数建立重构图像,若图像子块中含有弱小目标,则其表示系数是稀疏的,相反其表示系数是均匀分布的,且每个系数值均很小。这样,得到的重构红外图像的背景和目标就能明显区分开来。

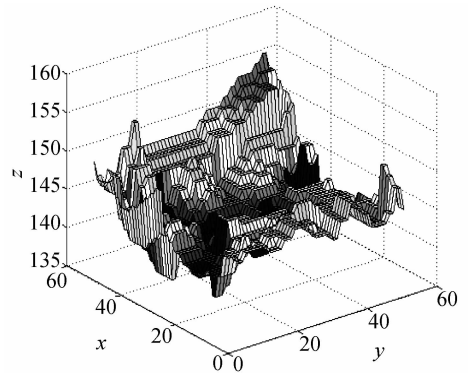
3 多成分超完备字典的建立

信号与图像能否形成稀疏表示本质上取决于超完备字典的自身性能。字典中原子与原图像的结构特征的匹配程度决定了字典对图像的稀疏表示效果,越匹配越易形成有效的图像稀疏表

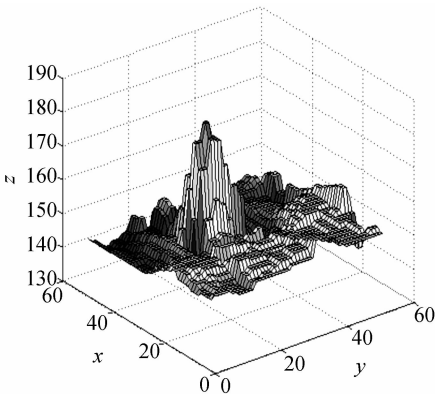
示^[11]。因此,建立有效的超完备字典是稀疏表示的重要前提。传统的超完备字典通过将标准的正交基进行级联来得到超完备字典,比如:小波基^[12]、Gabor 基^[13]等,这些基都是正交的,得到的完备字典不是冗余的。文献[3]通过二维高斯模型对红外目标进行建模,然后调节高斯函数里的变量得到不同的目标样本,最后,对样本进行训练学习建立超完备字典。这样得到的超完备字典是理想化的字典,而且只是对目标进行建模,没有包括红外图像的其他特征。本文依据人类视觉原理,提出一种包含红外图像各个层次结构特征的多成分超完备字典。一帧红外图像包括平滑背景、云层纹理、小目标等多个特征,如图 1 所示。



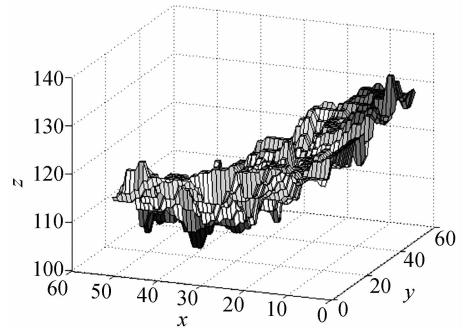
(a) 红外图像 3 种结构特征
(a) Three structural features of infrared image



(b) 背景三维显示
(b) 3-D display of background



(c) 目标三维显示
(c) 3-D display of target



(d) 云层纹理三维显示
(d) 3-D display of texture

图 1 红外图像的 3 种结构特征及三维显示

Fig. 1 Three structural features of infrared image and its 3-D display

模型表达式如下:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{\text{smooth}} + \mathbf{I}_{\text{texture}} + \mathbf{I}_{\text{target}}, \quad (5)$$

其中, $\mathbf{I}_{\text{smooth}}$ 为平滑背景, $\mathbf{I}_{\text{texture}}$ 为云层纹理, $\mathbf{I}_{\text{target}}$ 为目标特征, 这种模型能更逼真地表示包含弱小目标

的红外图像。通过不同的结构特征建立各自对应的子成分字典 \mathbf{U}_i , 子字典能够分别描述平滑、目标、纹理 3 种结构特征。由于各个成分字典中的原子具有类间不相干性, 这些子字典相互结合、相互

补充,得到一个全面的、覆盖范围广的多成分字典 U 。由于建立起来的多成分字典是冗余的,即为具有非正交性的超完备多成分字典,这样通过匹配追踪、遗传优化,更能形成对图像的最佳稀疏表示,通过表示系数和对应的原子向量就能对原图像进行重构,得到更加有利于目标检测的重构图像。多成分字典本质上是众多原子的集合,其公式如下:

$$U = \bigcup_{i=1}^n U_i. \quad (6)$$

本文采用二维高斯函数生成红外小目标样本,其公式如下:

$$I(i, j) = I_{\max} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{(i-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(j-x_0)^2}{\sigma_y^2} \right]\right). \quad (7)$$

分析红外弱小多目标图像样本和视觉皮层中神经元结构参数的相关性表明,对二维高斯函数中的自由变量必须进行约束,通过不同的约束条件才能得到适合不同结构特征的原子向量。另外,原子的纵横比必须在 $0 \sim 1$ 之间,这样得到的原子向量才是非正交的。由于对字典中原子个数有所限制,原子中的平面波应沿着椭圆形二维高斯函数的长轴开始传播,并且原子的半幅空间频率带宽必须小于 2 倍频程,不同的结构特征必须按照不同倍频程来平铺二维高斯空间的频率面。

本文对 500 frame 红外图像样本进行了训练,用公式(7)分别采用不同的约束变量(如表 1 所示)提取各个子字典需要的几何特征,将样本图像均展开为 $m^2 \times 1$ 的一维列向量,即为原子 x_i ,最后将多帧样本的列向量组成了对应的子成分超完备字典 $U_i = \{x_1, x_2, \dots, x_i, i=1, 2, \dots, n\}$ 。

表 1 超完备子字典各成分参数离散值

Tab. 1 Parameters of each component for over-complete sub dictionary

子字典成分	自由参数离散值				纵横比 η
	带宽 b	方向数 θ/nb	尺度 σ	相位 φ	
平滑子字典	/	/		/	1
目标子字典	1.5 2.0	6	$\sigma = \{2^i\}$ $j \in [0, \log_2^N - 3]$	$0, \pi/2$	0.7
纹理子字典	1.0	12		$0, \pi/2$	0.5

4 自适应杂波抑制

基于稀疏表示的红外图像杂波抑制方法是利用超完备字典对图像子块进行优化匹配逼近,计算图像子块在超完备字典下的稀疏表示系数,利用表示系数以及对应的原子向量对红外原图像进行重构,生成的红外重构图像在表示系数上有明显的区分性,若图像子块中含有弱小目标,则其表示系数是稀疏的,相反其表示系数是均匀分布的,且每个系数值均很小。

获得超完备字典下的最优稀疏优化匹配解本质上是 NP-Hard 问题,目前常用的优化匹配逼近方法有:松弛优化方法、贪婪的追踪方法与组合优化算法。本文在匹配追踪算法的基础上,提出一种基于多成分超完备字典下的自适应匹配追踪算法,即利用红外图像的灰度直方图分布,对图像进行分块,依据文献[7]提出的协方差算子提取图像的表现特征,通过多成分灰度分布特征的差异性选择对应的超完备字典对图像子块进行匹配追踪。

其算法流程如下:

(1)自适应构建多成分超完备字典 U ,包含原图像中的不同结构特征:平滑、目标和纹理 3 种子成分字典 $U_{\text{smooth}}, U_{\text{target}}, U_{\text{texture}}$;

(2)对原图像 f 进行结构灰度直方图统计,并对原图像进行合理分块,记分块后的总子块数为 m ,当前子块序号 $m=1$;

(3)通过计算原图像的协方差自适应选择与当前子块结构特征相一致的子成分字典 U ,对当前子图像块进行多尺度匹配追踪及稀疏分解;

(4)匹配初始化:令初始重构图像为原图像,初始迭代次数 $i=0$;

(5)表示系数粗计算:计算重构图像与之对应的子成分字典中全部原子的表示系数 a_i ;

(6)最佳系数极大化搜索: $r = \arg \min \|a\|_1$,记录原子下标 r 与最佳表示系数 a_i ;

(7)重构图像:利用表示系数 a_i 和对应的原子 x_i 按照公式(1)建立重构图像 H ;

(8)迭代停止规则:如果重构信号能量小于特定误差 ϵ , $\|H - f\|^2 \leq \epsilon$,则停止迭代,转至步骤(9)。否则, $i = i + 1$,转至步骤(5);

(9)输出:得到重构图像 H 。

5 实验结果及分析

对本文提出的算法在 CPU 为 Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz、3.01 GHz, 512 MB 内存的 PC 机上采用 matlab 软件平台进行验证, 分别对不同背景、不同目标数量的红外图像进行实验, 并与常用的红外图像预处理算法如 Top-Hat 滤波、高斯滤波结果比较, 最后通过客观评价指标对本文算法进行综合评价。

实验一, 首先对天空背景下包含单个目标的红外图像进行处理。原图信噪比较低、背景较为平缓、目标被背景及云层淹没。分别用 Top-Hat 滤波、高斯滤波和本论文提出的算法对图像进行处理, 原图像、实验结果及其三维显示如图 2~图 5 所示。

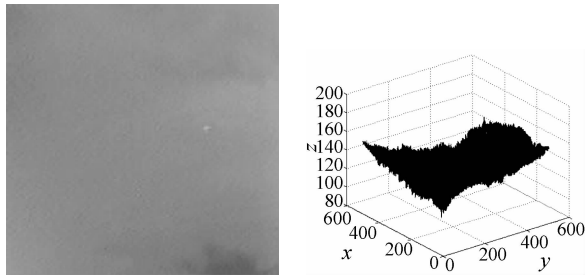


图 2 原图像及其三维显示图

Fig. 2 Original infrared image and its 3-D display

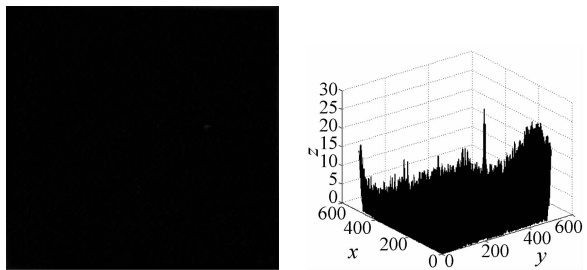


图 3 Top-Hat 滤波结果及其三维显示图

Fig. 3 Top-Hat filter and its 3-D display

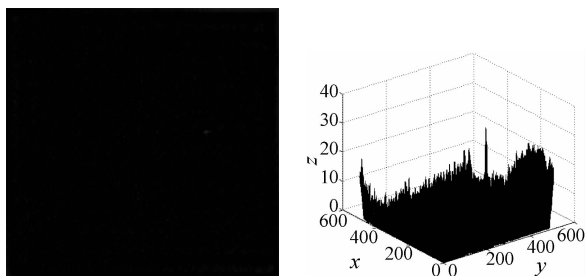


图 4 高斯滤波结果及其三维显示图

Fig. 4 Gauss filter and its 3-D display

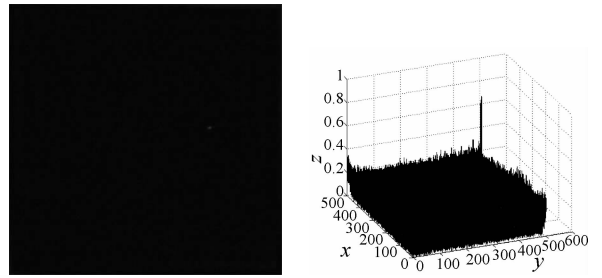


图 5 本算法结果及其三维显示图

Fig. 5 Proposed method and its 3-D display

由图 3、图 4 可以看出, Top-Hat 滤波、高斯滤波能够将目标和周围背景分离开来, 但是没有抑制图像的背景纹理, 由三维显示可以看出图像灰度分布依然不均匀, 其中一部分背景灰度值和目标相差不大。由图 5 可以看出, 本论文提出的算法可以很好地将目标和背景分离开来, 而且目标的大小和原目标一致, 经过归一化后, 背景都被抑制在 0.3 以下, 目标则在 0.9 左右, 达到了背景抑制, 突出目标的效果。

实验二, 为了进一步测试本算法的有效性, 本次实验采用较为复杂的海空背景图像, 原图如图 6 所示, 图像背景复杂, 包含多个纹理特征, 目标大小不明显、特征相当微弱, 且包含有噪声点。分别用 Top-Hat 滤波、高斯滤波和本文提出的算法对图像进行处理, 实验结果及其三维显示如图 7、图 8、图 9 所示。

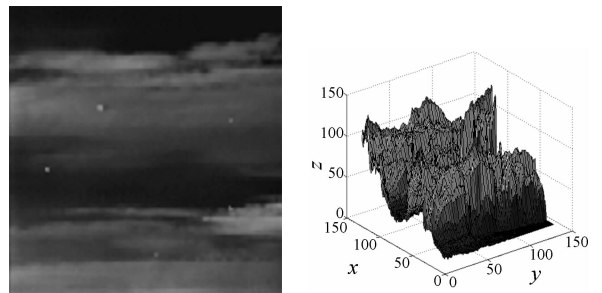


图 6 原图像及其三维显示图

Fig. 6 Original infrared image and its 3-D display

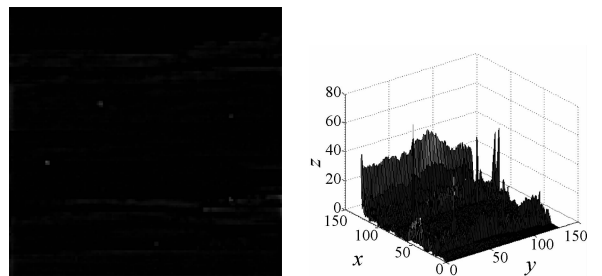


图 7 Top-Hat 滤波结果及其三维显示图

Fig. 7 Top-Hat filter and its 3-D display

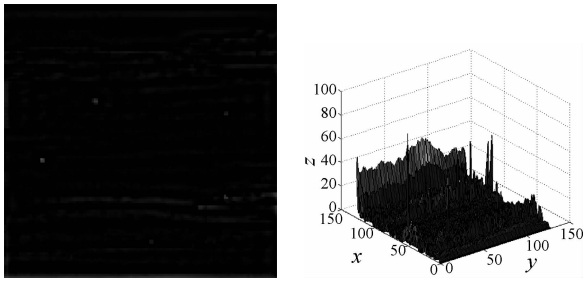


图8 高斯滤波结果及其三维显示图

Fig. 8 Gauss filter and its 3-D display

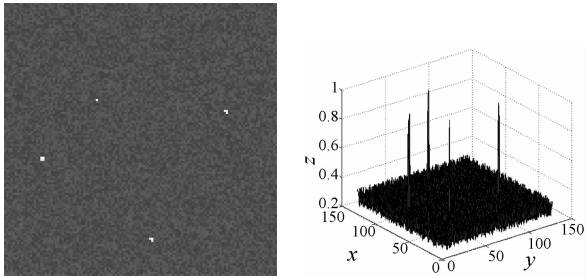


图9 本算法结果及其三维显示图

Fig. 9 Proposed method and its 3-D display

由图7、图8可以看出,Top-Hat滤波、高斯滤波虽然有突出目标的效果,但个别目标依然在背景杂波内,没有很好地抑制海面背景和天空的杂波,图像的灰度分布依然不均匀,图像边缘也没有得到抑制,之后的目标检测依然困难,没有达到抑制杂波的目的。由图9可以看出本文算法经过对平滑背景和海面纹理背景建立超完备字典,经过图像稀疏表示后能很好地将这些杂波抑制在同一系数附近,红外小目标则突出在0.7以上,达到了背景抑制的目标。

为了进一步说明本算法的性能,本文还采用评价函数背景抑制因子(BSF)、信噪比增益(ISNR)和计算速度(ETS)对上述处理进行量化比较分析。公式表示如下:

$$BSF = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (8)$$

其中, σ_1 为处理前的图像标准差, σ_2 为处理后的图像标准差。

$$ISNR = \frac{SNR_2}{SNR_1} \quad (9)$$

其中 SNR_1 为处理前的图像信噪比, SNR_2 为处理后的图像信噪比。

由以上公式可以看出,BSF、ISNR数值越大,红外图像的目标就越突出、背景抑制效果越好,具

体结果如表2所示。

从表2可以看出,在背景较为平缓、杂波结构比较简单时,Top-Hat滤波、高斯滤波算法的性能指标接近于本文算法,但本文算法的计算时间比前2个算法分别降低了44%和49%。当背景变化剧烈、图像的信噪比较低时,灰度形态学Top-Hat滤波、高斯滤波算法性能迅速下降。在输入的信噪比约为1.63的情况下,Top-Hat滤波和高斯滤波的信噪比增益分别仅为3.24和3.36。而此时,本文算法能够有效地保证滤波性能,可以获得11.56的信噪比增益。另外,本文算法运算时间比Top-Hat滤波、高斯滤波算法都少。以 1024×1024 的8位原灰度图像,50 frame/s为例,其每秒的数据量大约为50 MB。依据算法流程中的公式来看,每点像素最多进行100次乘加运算。按照算法迭代4次、图像子块分辨率 10×10 来计算,4次迭代最多需要 $4 \times 100 \times 1024 \times 1024 = 400$ M次乘加运算,TI公司的TMS320C6000系列DSP每秒可进行9600 M次的乘加运算,能满足实时性的要求。因此本文提出的算法不仅能很好地抑制背景和凸显目标,而且鲁棒性较强、计算量相对较小,易于实时实现。

表2 客观评价指标

Tab. 2 Objective evaluation indexes

IMAGE	σ_1 (σ_2)	SNR_1 (SNR_2)	BSF	ISNR	ETS(ms)
2	16.68	1.24	—	—	—
3	7.39	4.42	2.256	3.568	45.63
4	7.33	4.31	2.274	3.478	56.31
5	5.78	6.17	2.889	4.984	31.65
6	24.36	1.63	—	—	—
7	10.30	5.28	2.365	3.245	32.69
8	11.35	5.49	2.146	3.368	36.36
9	6.23	18.84	4.148	11.563	22.25

6 结 论

针对具有较多弱小目标的红外图像检测问题,提出了一种基于图像稀疏表示的自适应杂波抑制方法。通过对样本图像训练学习,构造了包含图像

各个层次结构特征的多成分超完备字典,然后通过红外图像的灰度直方图分布,自适应地选择与图像子块对应的超完备字典对图像进行最佳稀疏表示,根据表示系数以及对应的原子向量对图像子块进行重构,得到了突出红外小目标的高信噪比重构图像,达到了杂波抑制的目的。最后通过多项不同环境下的实验表明,该算法能够在复杂背景下自适应

地抑制杂波,提高图像的信噪比。对性能评价指标的分析得出,本算法计算量较小,实时性较强,鲁棒性较强,易于硬件实现。今后的工作方向是对噪声点和目标点的特征比较相似的红外图像,建立一种包含噪声特征的超完备子字典,并对这种图像子块进行特殊的处理来消除掉“伪目标”,进一步抑制杂波,为弱小多目标的精确检测打下基础。

参考文献:

- [1] 曹琦,王德江,张齐,等. 红外点目标检测中的能量积累[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 741-747.
CAO Q, WANG D J, ZHANG Q, *et al.*. Energy accumulation in infrared point target detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 741-747. (in Chinese)
- [2] 靳永亮,王延杰,刘艳滢,等. 红外弱小目标的分割预测[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 171-178.
JIN Y L, WANG Y J, LIU Y Y, *et al.*. Pre-detection method for small infrared target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 171-178. (in Chinese)
- [3] 汪大宝,刘上乾,寇小明,等. 基于 MRF 的自适应正则化红外背景杂波抑制算法[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(6): 440-446.
WANG D B, LIU SH Q, KOU X M, *et al.*. Infrared background clutter suppression algorithm of adaptive regularization based on MRF [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2009, 28(6): 440-446. (in Chinese)
- [4] WRIGHT J, YANG Y, GANESH A, *et al.*. Robust face recognition via sparse representation [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(2): 210-227.
- [5] MAIRAL J, ELAD M, SAPIRO G. Sparse representation for color image restoration [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 28, 17(1): 53-69.
- [6] WRIGHT J, YANG A, GANESH A, *et al.*. Robust face recognition via sparse representation [J]. *IEEE Transactions on Patten Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 31(2): 210-227.
- [7] YAGHOUBI M, DAUDET L, DAVIES M. Parametric dictionary design for sparse coding [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(12): 4800-4810.
- [8] CAO Y, LIU R M, YANG J. Infrared small targets detection using PPCA [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 29(4): 385-395.
- [9] 李一芒,何昕,魏仲慧. 红外预警实时图像处理系统设计与实现[J]. 液晶与显示, 2013, 28(1): 110-114.
LI Y M, HE X, WEI ZH H. Design and implement of real-time image processing system for IR warning system based on muti-passage [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 110-114. (in Chinese)
- [10] 李一芒,何昕,魏仲慧,等. 采用降维技术的红外目标检测与识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1297-1303.
LI Y M, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Infrared target detection and recognition using dimension reduction technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1297-1303. (in Chinese)
- [11] 刘火平,孟维平,宋立维,等. 红外图像序列中不均匀背景消除新方法[J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 539-544.
LIU H P, MENG W P, SONG L W, *et al.*. New method for eliminating non-uniformity background of IR images [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 539-544. (in Chinese)
- [12] 黄梅,吴志勇,梁敏华,等. 暗背景下低灰度图像的实时增强[J]. 液晶与显示, 2011, 26(3): 374-378.
HUANG M, WU Z Y, LIANG M H, *et al.*. Real-time enhancement method of low gray image under dark background [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 374-378. (in Chinese)
- [13] 孙玉胜,白克. 基于小波变换与加权滤波的电机红外图像增强[J]. 液晶与显示, 2010, 25(3): 439-443.
SUN Y SH, BAI K. Enhancement of motor infra-

red image based on wavelet transform and weighted filtering [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25 (3): 439-443. (in Chinese)

tals and Displays, 2010, 25 (3): 439-443. (in Chinese)

作者简介:



穆治亚(1985—),男,山西晋中人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事数字图像处理和光电测量方面的研究。E-mail: mufeng9@sina.com



魏仲慧(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,1982年于吉林大学(原吉林工业大学)获得学士学位,主要从事图像处理、图像存储等方面的研究。E-mail: wzhlvp@sohu.com



何 昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事图像处理、光电测量等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com



梁国龙(1983—),男,吉林公主岭人,助理研究员,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: liang_l_1984@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)